

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРІВ КАНАЛУ НА ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ У FINFET

О. В. Щербина^{1, а}, А. В. Гільчук¹

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

Анотація

Проведено комп'ютерне моделювання процесів самонагріву у 3D FinFET транзисторах. Дослідження виконано з допомогою програмного пакету GTS TCAD Framework. Для числового моделювання використано модель дрейфу і дифузії. Отримано розподіл температури за різних значень напруги на затворі. Досліджено вплив розмірів пристрою на потужність, що виділяється в процесі роботи та тепловий потік, що відводиться.

Ключові слова: FinFET, модель дрейфу та дифузії, самонагрів MOSFET, надійність

Вступ

Відповідно до закону Мура кожні два роки кількість транзисторів на кристалі має подвоюватись [1]. Тому одночасно зі зменшенням розмірів елементів інтегральних мікросхем вирішення теплових проблем пристроїв, що входять до їх складу набуває все більшої актуальності. Зменшення розмірів пристрою призводить до підвищеного нагріву у області стоку та збільшення опору елемента. FinFET на даний момент видається найбільш оптимальною конструкцією для створення транзисторів розмірами менше 22 нм [2]. Такий пристрій має малу потужність та площу, значну швидкодію та імунітет до короткоканальних ефектів. Ширина каналу визначається висотою фіну (тривимірний канал польового транзистору), таким чином, потік заряду може бути краще контрольований шляхом збільшення кількості плавників.

В процесі розробки польових транзисторів з високою швидкодією та малим споживанням енергії дослідники стикаються з багатьма задачами. Швидкодія покращується за рахунок зменшення розмірів пристрою, від десятків мікрометрів до декількох нанометрів. Однак таке стрімке масштабування не завжди позитивно впливає на швидкодію та ставить задачі, деякі з яких досі не розв'язані [3, 4]. Зокрема варто звернути увагу на теплові ефекти. FinFET виділяє надлишкову потужність у вигляді теплоти у ділянках з найбільшим опором. Якщо це тепло не відводиться належним чином, виникають ділянки підвищеної температури, що призводить до перегріву матеріалу, та, як наслідок – поганого функціонування пристрою [5].

Метою даної роботи було дослідження впливу розмірів тривимірного FinFET на процес самонагріву пристрою, зокрема, на потужність, що виділяється та тепловий потік, що відводиться.

1. Чисельне моделювання

Моделювання процесу самонагріву було виконано з використанням комерційного пакету GTS TCAD Framework [6]. Досліджувана геометрична 3D модель представлена на рис. 1 були побудовані за допомогою компоненти GTS Structure. Пристрій мав наступні геометричні розміри: ширина затвору – 32 нм, довжина каналу – 102 нм, висота каналу – 30 нм. Розрахунки були проведені за трьох значень ширини фіну (каналу) – 10 нм, 7.5 нм та 5 нм. Термічний опір контактів складав 10^{-4} К·см/Вт.

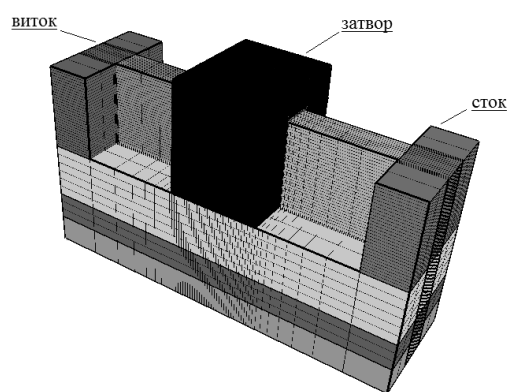


Рис. 1. Геометрична 3D модель FinFET пристрою

Числове моделювання було проведено за допомогою компоненти Minimos-NT. Прикладена до стоку напруга складала 0.5 В. Напруга на затворі змінювалась від 0 до 1 В. Для розрахунку було використано модель дрейфу та дифузії. Рівняння, які описують перенос носіїв заряду згідно з даною моделлю, наступні:

$$J_e(\vec{x}) = en_e(x)\mu_e E(\vec{x}) + eD_e \frac{dn_e}{d\vec{x}} \quad (1)$$

^аo.v.shcherbyna@gmail.com

$$J_h(\vec{x}) = en_h(x)\mu_e E(\vec{x}) + eD_h \frac{dn_h}{d\vec{x}} \quad (2)$$

де J — густина струму (відповідно, e — електронів, h — дірок), e — абсолютна величина заряду, n — концентрація носіїв, $D = \mu kT/e$ — коефіцієнт дифузії, μ — мобільність носіїв [7].

Розв'язавши ці рівняння можна отримати розподіл густини струму і у сукупності з розподілом електричного поля, отриманим з рівняння Пуассона (3):

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi) = e(n_e - n_h + N_A - N_D) \quad (3)$$

обчислити розподіл об'ємної густини внутрішніх джерел теплоти — $q(\vec{x}) = E(\vec{x}) \cdot J(\vec{x})$ [8].

Підставляючи цей розподіл у рівняння теплопровідності (4):

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + q(\vec{x}) \quad (4)$$

отримують температурне поле всередині пристрою.

2. Результати та обговорення

Результати чисельного моделювання самонагріву nmos FinFET пристрою з різними значеннями ширини каналу представлено на рис. 2-4. Видно, що зменшення розмірів призводить до підвищення температури пристрою.

На рис. 5 представлено поведінку потужності залежно від значення напруги на затворі для всіх значень ширини каналу.

Розрахунки показали, що при зменшенні площі контактів на 10%, потужність зменшується на 6%, а щільність теплового потоку збільшується на 5%. При зменшенні площі на 20% потужність зменшується на 13%, а щільність потоку теплоти зростає на 10%. Таким чином, результати дослідження демонструють, що при зменшенні розміру пристрою потужність, що виділяється, також зменшується. Однак, в той же час зростає щільність теплового потоку, що посилює вплив ефектів, пов'язаних з самонагрівом. Отже, виникає проблема тепловідведення, пов'язана з забезпеченням надійності пристрою та інтегральної схеми в цілому.

Висновки

Дослідження показало, що потужність, що виділяється в процесі роботи пристрою зменшується повільніше, ніж зменшується площа контактів, внаслідок чого щільність теплового потоку зростає. При зменшенні ширини каналу на 2.5 нм площа контактів зменшується на 10%, а потужність, що виділяється в процесі роботи пристрою — на 6%, внаслідок чого щільність теплового потоку зростає на 5%. Основною тепловою проблемою у FinFET пристроях є забезпечення умов для відведення теплоти та відповідно, підвищення надійності транзистору та інтегральної мікросхеми в цілому.

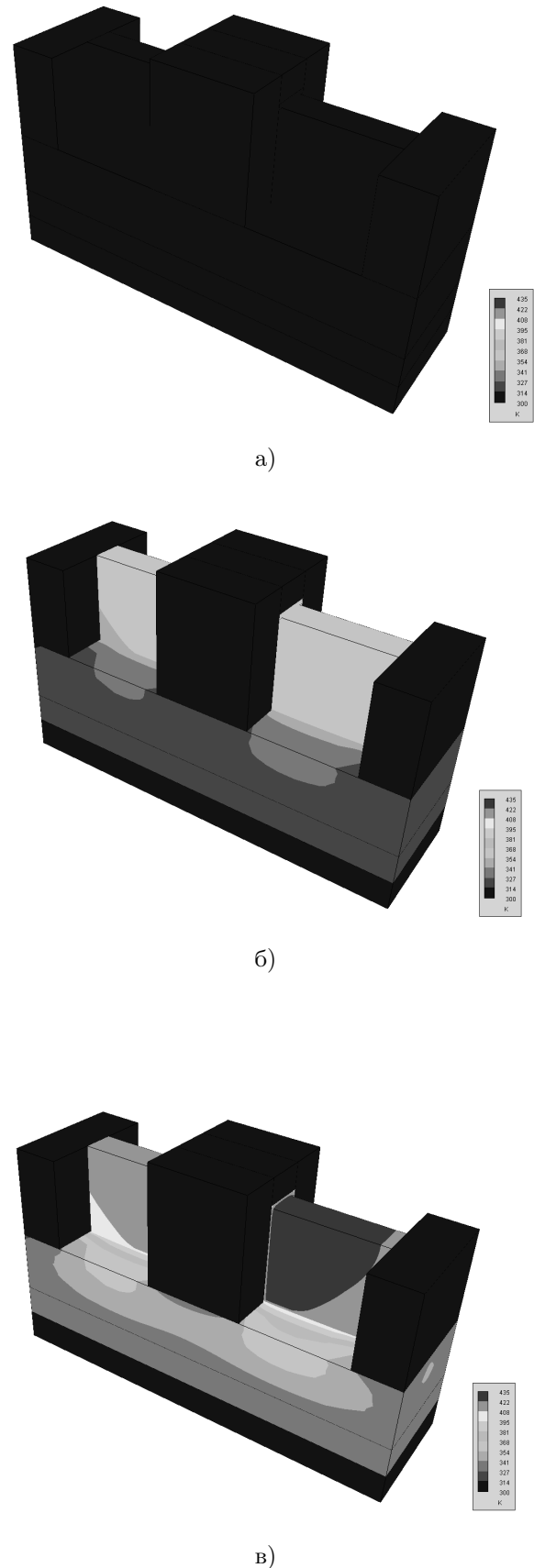
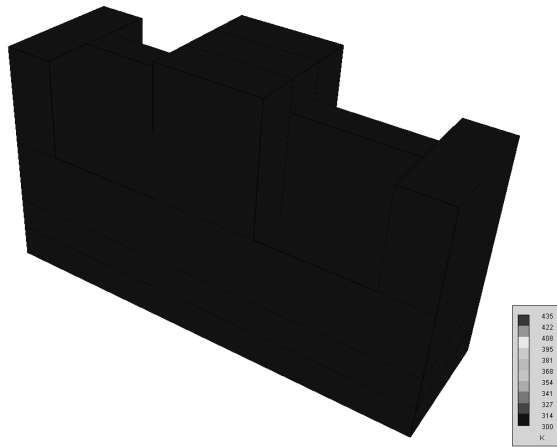
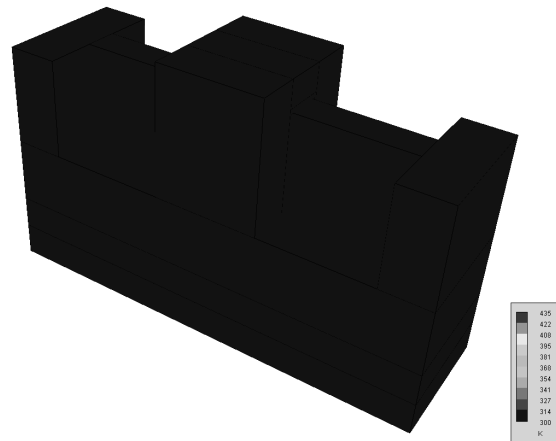


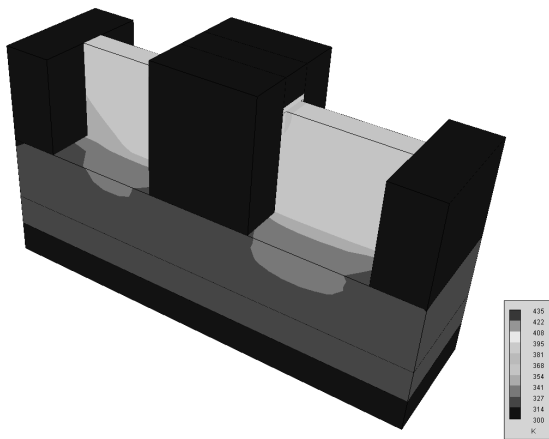
Рис. 2. Розподіл температури у nmos FinFET транзисторі з шириною каналу 10 нм та напругою на затворі: а – 0 В, б – 0.5 В, в – 1 В



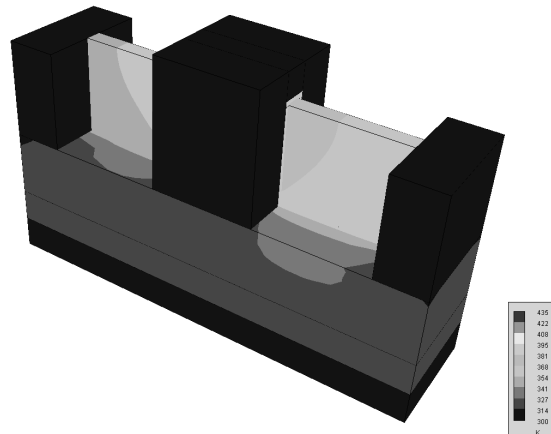
а)



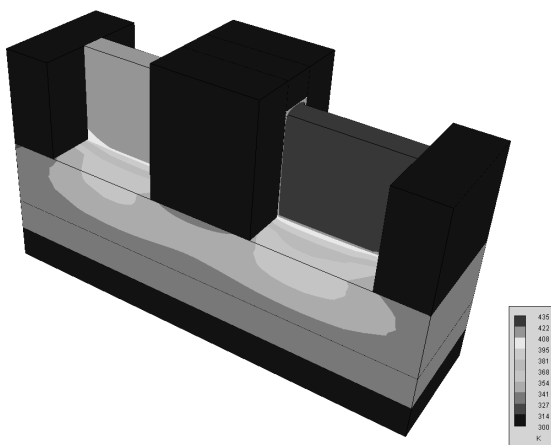
а)



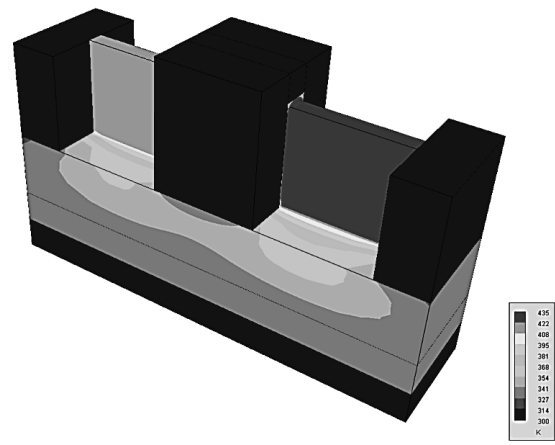
б)



б)



в)



в)

Рис. 3. Розподіл температури у pmos FinFET транзисторі з шириною каналу 7.5 нм та напругою на затворі: а – 0 В, б – 0.5 В, в – 1 В

Рис. 4. Розподіл температури у pmos FinFET транзисторі з шириною каналу 5 нм та напругою на затворі: а – 0 В, б – 0.5 В, в – 1 В

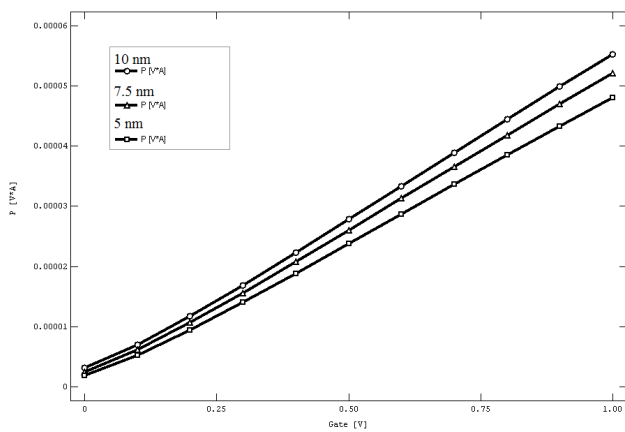


Рис. 5. Залежність потужності, що виділяється від напруги на затворі для різних значень ширини каналу

Перелік використаних джерел

1. Moore G. Cramming more components onto integrated circuits // Electronics. — 1965. — Vol. 38, no. 8. — P. 114–117.
2. Khan M., Buzdar A., Lin F. Self-heating and reliability issues in FinFET and 3D ICs // 2014 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). — 2014.
3. Prasad M., Mahadevaswamy U. Comparative Study of MOSFET, CMOS and FINFET: A Review // Third International Conference on Current Trends in Engineering Science and Technology ICCTEST-2017. — 2017.
4. Pal R., Sharma S., Dasgupta S. Recent trend of FinFET devices and its challenges: A review // 2017 Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS). — 2017.
5. Chopra S., Subramaniam S. A Review on Challenges for MOSFET Scaling // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. — 2015. — Vol. 2, no. 4. — P. 105–1057.
6. Global tcad Products. — 2019. — Access mode: <http://www.globaltcad.com/en/products.html>.
7. Iadonisi G., Cantele G., Chiofalo M. Introduction to Solid State Physics and Crystalline Nanostructures. — Springer Milan, 2014.
8. Hansch W. The drift diffusion equation and its applications in MOSFET modeling. — Springer-Verlag, 1991.